

Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos

J.A. de la Orden, J.A. López-Geta y J.M. Murillo

Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España)
E-mails: ja.delaorden@igme.es - lopez.geta@igme.es - jm.murillo@igme.es

RESUMEN

Este trabajo describe las principales experiencias de recarga artificial realizadas hasta la fecha por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en acuíferos detríticos. En algunas de estas experiencias los dispositivos de infiltración tan solo han funcionado a lo largo de uno o varios años con diferente duración del período de recarga. En otras, en cambio, como las denominadas "Vergel-Els Poblets" y "Guadix", el período de funcionamiento se ha extendido a lo largo de casi una década. En general, los resultados obtenidos pueden calificarse como esperanzadores para un futuro desarrollo de esta técnica, si bien hay que reconocer que muchas de las experiencias que aquí se presentan se han visto sometidas a condicionantes tanto de tipo técnico como no técnico. Entre estos últimos cabe citar factores como la disponibilidad y precio del suelo, aspectos legales, condicionantes socioeconómicos o aptitud favorable de las entidades gestoras del agua en España. Los condicionantes técnicos, por su parte, se refieren al hecho de la necesidad de disponer de estudios previos sobre la disponibilidad de excedentes hídricos para la recarga, tanto en cantidad como en calidad, así como sobre la aptitud del acuífero para ser receptor de agua procedente de fuentes externas. Los resultados más satisfactorios se han obtenido en las experiencias realizadas con agua residual bruta, ya que en ellas, no se ha detectado contaminación en el agua subterránea procedente del agua de recarga. También se hace referencia al programa de actuaciones que se tiene previsto realizar en materia de recarga artificial a nivel de Estado español.

Palabras clave: acuíferos detríticos, España, gestión de recursos hídricos, IGME, recarga artificial

Artificial recharge experiences made by IGME in detrritical aquifers

ABSTRACT

This paper describes the main artificial recharge experiences made up to date by the Spanish geological survey (IGME) in detrritical aquifers. In some of these tests, infiltration plants have been only working for one year or few years, with different length of the recharge periods. Otherwise, in other plants, as Vergel-Els Poblets or Guadix, the working period is longer than a decade. In general, the obtained results can be considered as hopeful for a future development of this technique. Nevertheless, we must say that several constraints have been found, both technical and non-technical ones. Among the latter, the most important are the availability and price of land, legal aspects, social and economic conditions, or the water authorities thoughts about artificial recharge. The technical constraints are, among others, the necessity of disposing of studies about the water exceedings availability, both in quantity and quality, and about how suitable is the aquifer for accepting water coming from outer sources to be recharged. The best results have been obtained in those experiences made using raw wastewater, because no pollution due to the recharge water contents has been detected in the groundwater. It is also briefly showed the plan for future new recharge experiences in the whole Spain.

Key words: artificial recharge, detrritical aquifers, IGME, Spain, water resources management

Introducción

Los resultados obtenidos en las experiencias de recarga artificial realizadas en España, donde la mayor parte de los dispositivos de infiltración tan solo han funcionado a lo largo de uno o varios años

con diferente duración del período de recarga, son esperanzadores. No obstante, es preciso seguir profundizando en los condicionantes técnicos y económicos que precisa esta técnica, así como en el número y distribución de los acuíferos susceptibles de acoger experiencias de recarga.

Para lograr este objetivo se ha elaborado un programa de actuaciones (Sahún y Murillo, 2000) donde se propone estudiar 35 acuíferos de acuerdo a un esquema de trabajo que contempla estudios de viabilidad técnica y económica, así como la redacción de proyectos de obra. Los acuíferos seleccionados son aquellos en que existen posibilidades de actuación según el sistema actual de aprovechamiento de los recursos hídricos en España. Es evidente que si se contemplan posibles escenarios futuros de gestión, que incluyeran trasvases de agua entre cuencas hidrográficas, el número de acuíferos donde sería posible aplicar esta técnica se ampliaría considerablemente, ya que existiría una mayor disponibilidad de agua en zonas donde la recarga artificial puede constituir una herramienta útil de gestión. En la presente comunicación no se entra a juzgar la necesidad o no de efectuar trasvases de agua entre determinadas regiones de España, aunque sí se apunta que el proyecto de viabilidad de esta obra debería de haber contemplado las posibles actuaciones de recarga artificial que se pueden derivar de la realización de la misma.

En base al conocimiento existente sobre las características hídricas de las zonas identificadas, para estudiar actuaciones de recarga artificial, se ha realizado una apreciación preliminar del volumen anual medio de recursos obtenibles mediante esta técnica que asciende a 300-350 hm³. Esta es una cantidad en principio pequeña dentro del contexto global del uso del agua en España, aunque equiparable (algo superior) a la actual reutilización de aguas residuales y al volumen de agua de mar o salobre desalado en la actualidad.

A título histórico, se comenta que la recarga artificial de acuíferos se aplica, por primera vez en España, a principios de la década de los años 50, en el aluvial del río Besós, y algunos años más tarde en el aluvial del río Llobregat, que constituye la experiencia más larga e importante de las realizadas en la península Ibérica (Custodio *et al.*, 1982).

Actuaciones de recarga artificial en acuíferos detríticos realizadas en España por el IGME

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) es el organismo que más experiencias de recarga artificial ha efectuado en España. A continuación, se hace una revisión general de las realizadas en acuíferos detríticos, comentando las características y resultados más significativos de cada una de ellas. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las mismas y en la Figura 1 su situación geográfica.

Recarga artificial en el acuífero aluvial del río Oja

El acuífero aluvial del río Oja, formado por gravas y arenas, tiene una superficie de 80 km² y un espesor entre 4.5 y 20 m. Su permeabilidad es muy alta, y la velocidad del flujo oscila entre 200 y 400 m/día. El acuífero está conectado hidráulicamente con el río Oja, y se recarga fundamentalmente por la infiltración a lo largo del lecho del río durante los meses de invierno, ya que en el verano, el cauce permanece prácticamente seco.

La recarga artificial se realizó durante los años 1987 y 1988 a través de tres balsas de infiltración de 5.320 m² de superficie y 10 km de canales. Los resultados pusieron de manifiesto una respuesta casi inmediata entre la evolución piezométrica a diferentes distancias de los dispositivos de recarga (algunas superiores al kilómetro) y las entradas de agua a las balsas.

El agua que se infiltraba en el dispositivo de recarga procedía de excedentes invernales del río Oja y de su afluente el río Santurdejo. Los caudales disponibles eran muy elevados, pudiendo superar en ocasiones los 5 m³/s, aunque solamente se derivaban a las balsas del orden de 500 l/s. El agua tenía una excelente calidad, con una mineralización baja y una cantidad de sólidos en suspensión inferior a 10 mg/l.

Aunque este valor de sólidos en suspensión es bajo, en las balsas de infiltración se produjeron fenómenos de colmatación que dieron lugar a que a partir del tercer año de funcionamiento, el caudal recargado se redujera notablemente.

La experiencia piloto realizada en el acuífero aluvial del río Oja confirmó que el mismo no presentaba un hidrodinamismo adecuado para intentar aplicar la técnica de la recarga artificial de acuíferos. Por consiguiente, se pensó que quizás las instalaciones construidas podían aprovecharse en la mejora de algunos aspectos relacionados con la calidad del agua del acuífero, así como en la corrección de los efectos provocados por algunos focos de contaminación, más o menos puntuales, debidos a las prácticas agrícolas. Los ensayos efectuados a este respecto pusieron de manifiesto una notable mejoría en la calidad del agua subterránea.

Recarga artificial en la vega del río Verde-comarca de Guadix

En la Comarca de Guadix, se localiza una superficie de 3000 ha de regadío, a ambos márgenes del río Verde; dedicadas al cultivo de hortalizas, verduras y frutales.

Localización Lugar y provincia	Tipo de instalación	Origen y calidad del agua de recarga	Objetivo	Duración de la experiencia	Caudal infiltrado
ALUVIAL DEL RÍO OJA (LA RIOJA)	3 Balsas de infiltración y 10 km de canales.	Excedentes superficiales del río Oja y Santurdejo. Agua con mineralización baja. Sólidos en suspensión inferiores a 10 mg/l.	Incrementar recursos hídricos para riego y mejorar la calidad del agua del acuífero donde existen captaciones para abastecimiento urbano.	1987 y 1988. En el primer año durante 3 meses, y en el segundo durante 5.	De 40 a 50 l/s.
VEGA DE GUADIX (GRANADA)	6 Balsas de infiltración.	Drenaje de la Mina de Alquife. Contenido en sólidos disueltos 250 mg/l. Bajo contenido de materia en suspensión.	Incrementar los recursos hídricos para riego.	Desde 1984 a 1998 durante 3 ó 4 meses al año.	De 200 l/s a 300 l/s.
CALCARENITAS DE CARMONA (SEVILLA)	1 Balsa de infiltración tipo "Fosa" y un pozo de gran diámetro.	Excedentes invernales del Canal del Bajo Guadalquivir. Calidad del agua para recarga mala.	Resolver problemas locales de sobreexplotación.	Menor de 3 meses.	6-7 l/s.
ALUVIAL DEL RÍO GUADALQUIVIR (SEVILLA)	2 Zanjas de infiltración (300 m) con pozos de 1 m de diámetro en su interior que se localizaban cada 10 metros.	Excedentes invernales del Canal del Bajo Guadalquivir. Calidad del agua de recarga mala. Contenido de sólidos en suspensión de 250 mg/l.	Incrementar los recursos hídricos para riego.	Menos de 1 mes.	De 250 a 500 l/s.
VALLE DEL ESGUEVA (VALLADOLID)	1 Sondeo profundo.	Excedentes invernales del río Esgueva. Calidad agua de recarga buena. Sólidos en suspensión 2-3 mg/l.	Incrementar los recursos hídricos para riego.	4 años.	De 2 a 20 l/s.
PLANA DE GANDÍA- DENIA SECTOR VERGEL-ELS POBLETS. (ALICANTE)	1 Pozo de gran diámetro con dos galerías paralelas a la costa de 100 m de longitud cada una. A partir de noviembre de 1996 se cuenta con 2 pozos de recarga.	Excedentes invernales del río Girona que presentan una conductividad de 750 μ S/cm. El contenido de sólidos en suspensión es de 3-5 mg/l.	Frenar el avance de la intrusión marina e incrementar los recursos hídricos para riego.	Desde diciembre de 1985 la operación de recarga tiene una duración de 5 a 6 meses al año.	35 l/s por pozo de recarga.
ALUVIAL DEL GUADALETE	2 Pozos rellenos de grava.	Excedentes invernales del arroyo de La Molineta. Contenido de sólidos en suspensión 6 mg/l.	Aumentar la garantía de suministro de los regadíos de la zona.	Durante 2001 15 días al año.	7-8 l/s.
MAZAGÓN (HUELVA)	6 Balsas de infiltración.	Agua residual urbana bruta.	Depuración e incremento de los recursos hídricos para regadío.	1 año.	De 1.2 a 2.4 l/s.
DEHESAS DE GUADIX	2 Balsas de infiltración.	Agua residual bruta.	Depuración.	Desde 1999 todos los días del año.	0.6 l/s

Tabla 1. Experiencias de recarga artificial realizadas por el IGME en España (elaborado a partir de López-Geta y Murillo, 1995)
Table 1. Artificial recharge experiences made by IGME in Spain (elaborated from López-Geta and Murillo, 1995)



Fig. 1. Localización geográfica dentro de España de las experiencias de recarga artificial que ha realizado el IGME en acuíferos detríticos
Fig. 1. Geographic location within Spain of the artificial recharge experiences made by IGME in detrital aquifers

Durante el invierno y primavera las galerías y pozos que suministran el agua para el riego dan caudales elevados. Sin embargo, a finales de verano sufren una gran merma, llegándose incluso a secar algunas de ellas.

Aguas arriba de la superficie de cultivo anteriormente descrita se encuentra la mina de Alquife, situada en el mismo acuífero que abastece a los aprovechamientos agrícolas, que requiere para su explotación la realización de un importante bombeo para el drenaje del yacimiento. El caudal bombeado ($7 \text{ hm}^3/\text{a}$) es vertido directamente al río Verde aguas arriba de la zona regable. Este importante volumen de agua se utiliza durante la época de riego, por lo que durante el resto del año el agua se pierde al no existir un sistema de regulación.

La operación que se planificó para lograr un mejor aprovechamiento del agua de la mina, se planteó como un proceso de recarga artificial en el acuífero que está constituido por depósitos detríticos que corresponden a una secuencia de gravas, arenas y limos del Pliocuaternario, con un espesor entre 80 y 300 m y transmisividad de $80 \text{ m}^2/\text{d}$ a $800 \text{ m}^2/\text{d}$ y una porosidad eficaz entre 3% y 15% .

El dispositivo de recarga que se construyó consta de seis balsas que tienen una superficie de infiltración de 11500 m^2 y un volumen máximo de agua almacenada de 35000 m^3 . El caudal de recarga no bajó de 200 l/s y la calidad del agua de recarga fue óptima ya que la materia en suspensión era muy baja, presentaba bajo contenido en flora bacteriana y una composición química similar a la del acuífero, lo que favorecía que no se produjeran reacciones perjudiciales. Su facies hidroquímica era bicarbonatada cálcico-magnésica y su contenido en sólidos disueltos de 250 mg/l .

El dispositivo de control que se utilizó estaba formado por 20 puntos de observación, alguno de ellos con sistemas de registro continuo.

El volumen medio infiltrado fue de $17400 \text{ m}^3/\text{d}$ y la capacidad inicial de infiltración de 3 m/d , aunque posteriormente fue tomando sucesivamente los valores de 1.35 m/d , 1 m/d y 0.65 m/d lo que redujo los volúmenes infiltrados a $7830 \text{ m}^3/\text{d}$, $5800 \text{ m}^3/\text{d}$ y $3770 \text{ m}^3/\text{d}$ respectivamente.

Durante la fase de proyecto, para estimar la repercusión económica de las inversiones a realizar y los costes de explotación en el regadío, se supuso un período de amortización de las instalaciones de 10

años y unos intereses del 8% del capital. El coste medio del m³ del agua, según precios de 1999 se estimó en 0.071 euros, para unos bombeos de 2.3 hm³/a, teniendo presente la reducción de la capacidad de infiltración por colmatación.

Con este planteamiento se propuso la mejora de 500 ha de regadío infrautilizadas en aquel momento por falta de dotación suficiente de agua, con una repercusión del costo por hectárea, teniendo en cuenta la inversión a amortizar y el coste de explotación (personal, mantenimiento y energía) de 328.25 euros de 1999.

Esta instalación de recarga estuvo en funcionamiento, prácticamente sin interrupción, desde el año 1984 hasta que se paró la explotación minera en 1998.

Recarga en el acuífero de las "calcarenitas de Carmona"

La zona donde se ubicó la experiencia de recarga artificial se localiza a 10 km al Sur de la ciudad de Sevilla y a una distancia aproximada de 1 km de un importante canal de riego que se denomina Canal del Bajo Guadalquivir.

En esta zona, tradicionalmente de secano, se han producido durante los últimos años un considerable aumento de los cultivos de regadío (fundamentalmente olivar, cítricos, algodón y alfalfa) que son atendidos con aguas superficiales procedentes del canal del Bajo Guadalquivir, y con aguas subterráneas captadas mediante pozos y sondeos en el acuífero de las calcarenitas de Carmona, que tiene una superficie de afloramientos permeables de unos 150 km².

El déficit hídrico para esta unidad acuífera se estima en 9.5 hm³/a y se traduce en un notable y generalizado descenso de los niveles piezométricos, que en las zonas de mayor explotación alcanza los 10 m.

La formación permeable, constituida por areniscas calcáreas (calcarenitas), presentan en la zona un espesor medio de 40 m, encontrándose recubiertas por una formación margolimososa, de baja permeabilidad, de unos 6 m de potencia. El muro impermeable del acuífero lo forman unas margas de color azul.

Por lo que respecta a la calidad del agua del acuífero se puede decir que se trata de agua dura, con mineralización notable y de facies bicarbonatada cálcica.

Las aguas superficiales utilizadas en la recarga artificial, que proceden del canal del Bajo Guadalquivir, presentan una calidad admisible, con valores medios de DBO₅ de 7 mg/l, y de conductividad de 1310 µmhos/cm. Se han detectado contenidos pun-

tuales en fenoles, aceites y grasas que superan los límites admisibles establecidos por la reglamentación sanitaria española.

El sistema de recarga es mixto, ya que consta de una balsa de infiltración, tipo fosa, con su correspondiente balsa de sedimentación, y de un pozo de 9.5 metros de profundidad y 1.20 metros de diámetro, con una superficie útil de infiltración de 28 m².

Las pruebas de recarga realizadas sobre esta instalación piloto, no superiores al mes cada una de ellas, pusieron de manifiesto, para una hipótesis que consideraba coeficientes de infiltración de 5 m/d. que se precisaría una superficie de infiltración de 1.5 ha para recargar los 9.5 hm³/a, en que se evalúa el déficit actual, si el período de operación era de 4 meses por año.

La tasa de infiltración era tan elevada porque en el fondo de la balsa de recarga se produjo a lo largo de las pruebas de infiltración un pequeño sumidero.

Una vez finalizada esta experiencia piloto, que se efectuó durante el año 1991, el proyecto se abandonó por falta de disponibilidad de agua, aunque se tiene intención de retomarlo en un futuro relativamente inmediato si la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (organismo gestor de la cuenca de este río) confirma la existencia de excedentes de agua en el canal del Bajo Guadalquivir.

Recarga artificial en el acuífero aluvial del río Guadalquivir

Sobre este acuífero se sitúa un extensa superficie de riego de más de 30000 ha cuya demanda se satisface básicamente con aguas de superficie. Para esto se ha construido una red de canales y acequias que parten de dos canales principales que enlazan la zona de riego con los embalses situados aguas arriba. No obstante se producen períodos en los que las disponibilidades de agua superficial no son suficientes para satisfacer la demanda existente, por lo que es necesario bombear agua subterránea.

Una de las medidas que se consideró idónea y operativa para garantizar estos bombeos fue analizar la viabilidad de programar operaciones de recarga artificial utilizando los excedentes invernales que circulan por el río Guadalquivir.

El dispositivo de recarga que se diseñó tuvo en cuenta tanto las características geológicas de la zona, que presenta un nivel impermeable en superficie con un espesor comprendido entre 1 y 10 m, como la calidad del agua a utilizar, con abundancia de sólidos en suspensión. Estos condicionantes aconsejaron que la instalación de recarga se estableciera como un dispositivo mixto de zanja rellena de arena y grava, que

actuaría de filtro, con sondeos dentro de ésta, que atravesarían totalmente el acuífero, hasta tocar la base impermeable del mismo. La zanja tendría una longitud de 500 m, una profundidad de 5 m y un ancho de 11.80 m.

El agua disponible para la recarga procedería de uno de los canales principales de riego y se elevaría mediante bombeo hasta una balsa de decantación donde se eliminaría una parte de los sólidos en suspensión. Posteriormente el agua recorrería la zanja de recarga, donde una vez filtrada a los sondeos de recarga la introducirían en el acuífero.

Los principales resultados obtenidos en las pruebas realizadas fueron los siguientes (Murillo *et al.*, 1994):

- La respuesta piezométrica en las inmediaciones de la instalación fue muy rápida, con ascensos de hasta 3 ó 4 m. Los descensos a los diez días de finalizada la experiencia se evaluaban por término medio en 1.5 m.
- Los ascensos habidos en los piezómetros situados a una distancia intermedia se cuantificaban en 1.5 m, con un desfase entre caudal infiltrado y el incremento experimentado por el nivel piezométrico de 7 a 10 días.
- El efecto del domo de recarga provocaba que el valor del gradiente (entre el uno al cuatro por mil) se multiplicara por cinco en las inmediaciones de la instalación.
- La velocidad de circulación del agua subterránea, bajo la influencia del domo de recarga, se cuantificó entre 26 y 70 m/d, por lo que el tiempo de permanencia del agua recargada en el acuífero estaría comprendido entre 57 y 150 días antes de ser drenada nuevamente al río.
- La instalación de decantación no se mostró suficientemente efectiva como para atajar el problema de los sólidos en suspensión. Estos se evaluaron en 250 mg/l lo que provocó una rápida disminución de la recarga a través del lecho de la zanja de infiltración.

Los resultados obtenidos no se estimaron lo suficientemente buenos como para continuar la experiencia, por lo que la misma se pospuso a la realización de estudios de mayor detalle que ubicaran la instalación sobre zonas más alejadas del río y que utilizaran aguas de mejor calidad. Esta experiencia de recarga se realizó a lo largo del año 1991.

Recarga de acuíferos profundos en el valle del río Esgueva

El agua utilizada en esta operación de recarga se bombeaba del río Esgueva, desde un punto situado a unos 300 m del sondeo de inyección, tomándose

directamente del cauce sin necesidad de realizar ninguna obra específica, salvo un dispositivo de filtrado en la aspiración de la bomba.

El caudal inyectado en el sondeo al comenzar la recarga cada día era del orden de 15 l/s, llegando en ocasiones a superar los 17 l/s. No obstante el caudal se reducía rápidamente, a medida que el agua subía en el sondeo, hasta alcanzar un valor de 10 l/s para un nivel del agua de 20 cm por debajo del nivel del terreno. El caudal específico para la recarga, una vez estabilizado el nivel en boca de sondeo, era del orden de 0.35 l/s/m.

Los sólidos en suspensión alcanzaban valores reducidos del orden de 2-3 mg/l si bien, con algún aumento brusco del caudal del río, se detectaban valores de hasta 30 mg/l.

Para paliar en parte el efecto de colmatación por sólidos en suspensión se instaló, antes de la inyección de agua en el sondeo, un filtro de grava que redujo el valor de este parámetro a 0.5 mg/l.

El modelo matemático de flujo, sobre el que se simularon diversas hipótesis de recarga, indicó que se precisarían del orden de 15 sondeos de recarga, con un caudal de inyección de 20 l/s por sondeo, para contrarrestar el descenso de niveles producido por un bombeo del orden de 9 hm³/a, que constituía la sobreexplotación del acuífero.

Esta experiencia de recarga artificial que se inició en 1984 estuvo inyectando agua en el acuífero hasta 1987 en que se desmanteló la planta piloto por falta de presupuesto para continuar la experiencia.

Recarga artificial en el acuífero Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets. (Alicante)

El acuífero Plana de Gandía-Denia (sector Vergel-Els Poblets) está formado por materiales Pliocuaternarios (gravas y arenas) de permeabilidad variable y 27 m de espesor medio.

La zona presenta una demanda hídrica importante (regadío de cítricos y abastecimiento de los núcleos urbanos que se asientan sobre el acuífero) que, casi en su totalidad se suministra a partir de recursos subterráneos. El régimen pluviométrico de esta zona se encuadra asociado a fenómenos de gota fría (lluvias puntuales y torrenciales), por lo que origina una escorrentía superficial que se pierde con rapidez en el mar y no puede ser regulada mediante obras hidráulicas de superficie a causa de la topografía llana de la zona.

En la actualidad, se está produciendo en este acuífero, especialmente en los años secos, una extracción por bombeo superior a los recursos del acuífero. Este sobrebombeo origina, a su vez, dos problemas: el primero es la sobreexplotación en sí misma, con el

consiguiente descenso de los niveles piezométricos, y el segundo es el avance de la cuña salina desde el borde del mar, lo que provoca la salinización de las captaciones más próximas a la costa, inutilizando sus aguas para cualquier uso e induciendo su abandono. Un problema adicional que tiene el acuífero es la contaminación generalizada debido a las prácticas agrícolas.

La recarga artificial del acuífero de la Plana de Gandía-Denia comenzó a realizarse por iniciativa de los agricultores de la zona en diciembre de 1985. El objeto de la misma fue aprovechar los excedentes hídricos, procedentes de una galería de drenaje del acuífero, no utilizados en los regadíos del término municipal de Els Poblets. La recarga artificial se realizó mediante un pozo con dos galerías horizontales en profundidad. El volumen medio infiltrado anualmente mediante este método supera ligeramente los 400000 m³.

Actualmente la recarga artificial se realiza a través de dos redes operacionales diferentes (Figura 2) (De la Orden *et al.*, 2000 a). La primera de ellas es la comentada en el párrafo anterior, y la segunda red, toma el agua de un azud situado en el río Girona, unos 200 m aguas arriba del punto donde se localiza la galería de drenaje, que está conectado a una red de tuberías que transportan el agua hasta la zona regable, donde es distribuida. Cuando existen excedentes, éstos se conducen, mediante una tubería de fibrocemento de 300 mm de diámetro, hasta tres pozos abiertos de 1 m de diámetro y galerías horizontales en profundidad, en los cuales se introducen por gravedad. El agua de recarga presenta una facies bicarbonatada cálcica, con un contenido en nitratos de 35 mg/l, en sulfatos de 84 mg/l, en cloruros de 54 mg/l, y en sodio, de 30 mg/l, sin presencia de contaminación orgánica significativa, y con una conductividad de 750 mS/cm. Todos estos valores indican un índice de calidad superior al del agua almacenada en el acuífero.

El análisis de la experiencia de recarga desde el año 1985 hasta la actualidad ha puesto de manifiesto la idoneidad de este tipo de instalación de infiltración para la recarga artificial, ya que no se ha observado merma aparente de la potencialidad del pozo, expresada mediante su tasa de infiltración o caudal específico. La razón más probable de este favorable comportamiento debe buscarse en el hecho de que los caudales medios introducidos en los pozos de recarga, estimados en un orden de magnitud cercano a 35 l/s, está por debajo de la capacidad nominal de los pozos, que según los ensayos de bombeo previos, puede llegar hasta los 100 l/s. Lo que sí se ha observado es una colmatación importante del pozo, que ha perdido, en todos los años que dura la recarga, apro-

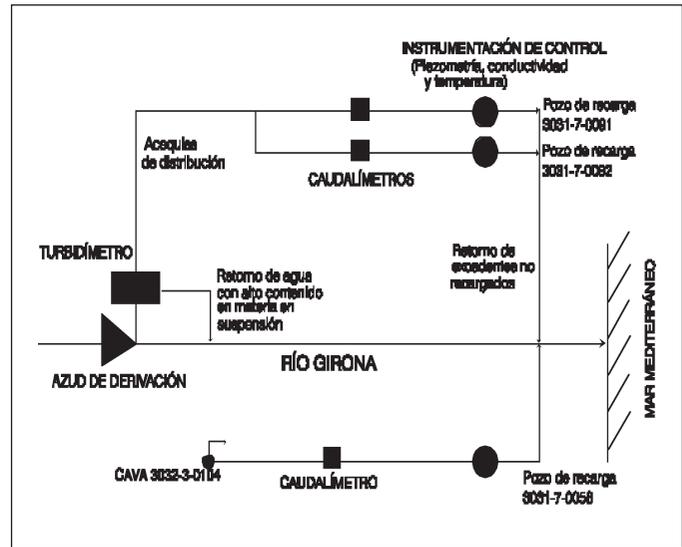


Fig. 2. Redes de recarga artificial en el acuífero Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets
 Fig. 2. Artificial recharge nets in the Plana de Gandía-Denia aquifer, Vergel-Els Poblets area

ximadamente 11 metros de altura como consecuencia de la deposición de los sólidos en suspensión que lleva el agua de recarga.

En cuanto al efecto que produce la recarga artificial en el acuífero, el reducido espesor saturado del mismo, unido a unas características identificadas por una alta permeabilidad, origina que la velocidad de circulación del agua subterránea a través del medio poroso sea elevada. Esta gran rapidez de circulación incide negativamente sobre la eficiencia de la recarga artificial. A este respecto, el modelo matemático de flujo del acuífero realizado muestra que, con independencia del caudal que se recargue, únicamente el 20% del mismo queda almacenado en el acuífero para ser aprovechado con posterioridad; el resto circula subterráneamente hasta descargarse en el mar (De la Orden *et al.*, 2000 b). Un aspecto a resaltar de la experiencia es que los costes que supone la operación de recarga artificial son relativamente pequeños, ya que se trata de aprovechar instalaciones ya existentes, que precisan unas reducidas inversiones en nuevas obras de construcción. En este sentido se ha calculado que el precio del agua recargada que se pone en almacenamiento en el acuífero es de 0,01 - 0,02 €/m³.

Recarga artificial en el acuífero aluvial del río Guadalete

Recientemente se ha construido por parte de la

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, una instalación piloto de recarga artificial en el acuífero aluvial del río Guadalete, en el paraje conocido como Los Sotillos, en Cádiz.

Los objetivos de la recarga artificial se centran en garantizar los actuales usos y apoyar en épocas de sequía a los abastecimientos públicos, así como regular los excedentes hídricos del arroyo de La Molineta y de los demás arroyos que atraviesan el acuífero.

El sistema de recarga consta de un azud, construido en el cauce del arroyo, que retiene el agua circulante por el río y los desvía hacia las instalaciones de recarga. Primeramente, entra en una balsa de decantación, recorriéndola a través de serpenteos construidos en su interior para aumentar el tiempo de residencia del agua en la balsa y facilitar así la decantación de sólidos en suspensión. De esta balsa pasa a dos pozos, rellenos de grava para disminuir el efecto de la colmatación, en donde se realiza la infiltración en el acuífero.

Las instalaciones se han terminado recientemente, por lo cual no es posible ofrecer resultados sobre el efecto de la recarga artificial.

Las instalaciones de Mazagón (Huelva)

La primera experiencia de depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa en el terreno llevada a cabo en España fue la realizada (Nieto *et al.*, 1994) por el ITGE en colaboración con el BRGM francés, en el término municipal de Mazagón. Esta población cuenta con 1000 habitantes en invierno aunque puede llegar a multiplicar por diez este número en verano.

Las instalaciones de infiltración se construyeron a 4 km de Mazagón (Huelva) en un claro del pinar del cordón litoral. El material constitutivo del lecho filtrante eran arenas de duna que con una potencia de unos 30 metros descansan sobre un sustrato margoso impermeable. El nivel piezométrico se situaba a 6-8 m de profundidad.

La planta de tratamiento de aguas residuales urbanas (ARU) ocupa una superficie de media hectárea, y está dividida en dos sectores. La parte alta recibe el ARU bruta y contiene los elementos de tratamiento y almacenamiento, y en la parte baja se ubican las balsas de infiltración. El pretratamiento consiste en un decantación de un día de duración en una balsa de 17 x 5 x 2 m. Antes de ésta, se procede a un desbaste y desarenado con eliminación de flotantes. El caudal de entrada medio es de 7 l/s.

El agua procedente de la decantación se distribuye en seis balsas de infiltración por gravedad mediante

tuberías de PVC de 160 mm y válvulas manuales. En cada balsa se ha instalado un pozo de observación dotado de cinco puntos de control del percolado a diferente profundidad (30, 60, 100, 150 y 200 cm). Además se instalaron en tres de las balsas muestreadores de gas, y en una un sistema de medida de la resistencia eléctrica del terreno. El agua subterránea se vigila a través de tres piezómetros separados entre sí 50 m.

El ritmo de descarga fue de 100 m³/d sobre una superficie de 400 m² en dos balsas contiguas. Durante un breve periodo de tiempo se ensayó una carga de 500 l/m² que resultó claramente excesiva. Cada pareja de balsas funcionó con periodos de humectación de 15 días y de desecado de 30.

La tasa de infiltración inicial de 24 m/d se redujo al final del periodo de recarga a 8-12 m/d, un rastrillado manual de la balsa dos o tres veces por semana fue suficiente para evitar que la capacidad de infiltración descendiese aún más.

El domo de recarga que se formó permitió la existencia de un espesor no saturado de aireación de unos 4 m.

El rendimiento en la eliminación de la DQO fue del 90% a una profundidad de 2 m. La oxidación del amonio, a la misma profundidad, fue cercana al 100%. La reducción en la carga bacteriana no presentó unos resultados tan buenos, debido a la granulometría del lecho filtrante, y a que después de 2 metros de percolación los coliformes totales disminuyen en 1.2 unidades logarítmicas, 1.1 para los coliformes fecales y 1.4 para los estreptococos fecales. No obstante las muestras bacteriológicas tomadas en los piezómetros de control a una mayor profundidad (4 a 6 m) mostraron una total ausencia de contaminación bacteriana cuando el ritmo de descarga fue de 100 m³/d (Nieto *et al.*, 1994).

La instalación de Dehesas de Guadix

Esta experiencia tuvo por objetivo continuar con las investigaciones iniciadas en la experiencia de Mazagón. Para ello, se eligió la población de Dehesas de Guadix, provincia de Granada, que tiene 669 habitantes estables, caracterizándose sus aguas residuales por no estar afectadas por vertidos industriales, y mostrar una composición del agua residual idónea, algo más concentrada que el tipo medio debido al bajo consumo per cápita (aproximadamente 100 l/hab/d).

La instalación se ha construido sobre materiales que tienen las siguientes características hidráulicas: permeabilidad superficial media de 0.07 m/d, textura

franco limosa, y composición mineralógica con predominio de esmectitas en su fracción arcilla. El nivel freático se sitúa de promedio a 18 m de profundidad.

Las instalaciones constan básicamente de tres sistemas. El primero de ellos es el sistema de tratamiento previo: las aguas residuales, una vez desarenadas y desengrasadas, se almacenan en una balsa de 50 m³ de capacidad y se decantan en otra balsa de igual capacidad. En realidad el proceso de decantado es doble, siendo el resultado final una eliminación de sólidos en suspensión mayor del 75%. El fondo de las balsas se limpia periódicamente vertiéndose el agua a un filtro verde, y constituyendo los lodos decantados en su fondo un subproducto adecuado para su uso en agricultura.

El segundo sistema es el de infiltración propiamente dicho. Consta de dos balsas de 35 m x 35 m, divididas en cuatro semibalsas que funcionan según ciclos de humectación y desecación, necesarios para la correcta mineralización de la materia orgánica y eliminación de los compuestos de nitrógeno. Una característica constructiva de las balsas, que no es frecuente en este tipo de instalaciones, es que se encuentran excavadas en el terreno con el fin de ganar la suficiente cota para no necesitar el empleo de bombas para el transporte y reparto superficial del agua. Antes de su vertido en las balsas de infiltración, el agua pasa por una arqueta dotada de un caudalímetro y un turbidímetro que realizan medidas de forma continua. Por último, se ha dotado a la instalación de un complejo sistema de vigilancia y control (tercer sistema) constituido por cinco piezómetros de entre 50 y 60 m de profundidad, situados en el entorno de las balsas. Asimismo, en el centro geométrico de las balsas se han construido dos pozos de gran diámetro, dotados de drenes horizontales que permiten el muestreo del agua de percolación en tramos de 0.5 metros, desde 0.5 hasta 3 m.

En total se han vertido 13138 m³ de agua residual (año 1999). El sistema se muestra especialmente eficaz en la eliminación de la contaminación orgánica. En los drenes profundos se llega a reducciones de la DQO entre el 77.2% y el 90%, de la DBO entre el 87.5 y el 96.7% y del COT entre el 77.4 y el 80%. La reducción en sólidos en suspensión oscila entre el 70.6 y 94%. La eliminación de fósforo alcanza hasta un 76.1%, aunque a nivel del acuífero es prácticamente del 100% (Moreno et al., 2000).

Resultados y conclusiones

En la Tabla 1 se muestra un resumen donde se indican las principales características técnicas de las

experiencias realizadas, así como la finalidad y duración de las mismas.

Una de las principales conclusiones que se derivan de las actuaciones descritas se refiere al hecho de que las mismas se han visto afectadas tanto por condicionantes técnicos como no técnicos. En relación a este último aspecto cabe indicar que factores tales como disponibilidad de terrenos, usos del suelo, aptitud favorable de las autoridades públicas y gestoras del agua, consideraciones de tipo cultural, condicionantes socioeconómicos o aspectos legales, han determinado en ocasiones el éxito o el fracaso de una determinada experiencia.

Con respecto a los condicionantes técnicos es preciso indicar la necesidad de realizar previamente a la construcción de la instalación de recarga artificial, un estudio detallado de disponibilidad de agua tanto en cantidad como en calidad, así como evaluar la aptitud que presenta el acuífero frente a la operación de recarga artificial, bien mediante la realización de experiencias piloto de corta duración, o bien mediante la elaboración de modelos matemáticos.

Por último destacar que los resultados más interesantes quizás se han obtenido en las experiencias que ha utilizado agua residual bruta. En ambas instalaciones (Mazagón y Dehesas de Guadix) se evidencia la no afección a las aguas subterráneas tras un periodo de funcionamiento de un año. Asimismo, su rendimiento como sistema de depuración es elevado ya que muestra gran eficacia en la eliminación de materia exógena. Hasta la fecha el modelo experimental que se ha ensayado resulta apto para la eliminación de aguas residuales urbanas, sin componente industrial, de pequeños núcleos de población (menos de 1000 habitantes).

Referencias

- Custodio, E., Isamat, J. y Miralles, J. 1982. Twenty years of groundwater recharge in Barcelona (Spain). *Duwk Bulletin 11 Artificial Groundwater Recharge*. Volume 1. Verlag Paul Parey. Hamburg/Berlin.
- De la Orden Gómez, J.A., Murillo Díaz, J.M. y Rodríguez Hernández, L. 2000a. Instalaciones de recarga artificial tipo pozo con galerías horizontales. Evaluación y caracterización de los dispositivos de recarga artificial de las comunidades de regantes de Miraflor y Vergel-Setla (Alicante). *V Congreso Geológico de España*. Alicante, Geotemas 1 (2), 105-110.
- De la Orden Gómez, J.A., Murillo Díaz, J.M. y Rodríguez Hernández, L. 2000b. Los modelos matemáticos: una herramienta básica para evaluar la viabilidad de operaciones de recarga artificial de acuíferos. Aplicación al acuífero Plana de Gandía-Denia, sector Vergel (Alicante). *V Congreso Geológico de España*. Alicante. Geotemas 1 (2), 185-188.

- López-Geta, J.A. y Murillo, J.M. (1995). Recarga artificial de acuíferos. Experiencias realizadas por el Instituto Tecnológico Geominero de España. *XI Congreso Latinoamericano de Geología*. Caracas (Venezuela). Documento en CDRom.
- Moreno, L., Liquiñano, M.C., Rubio, J.C. y Murillo, J.M. 2000. Eliminación de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Impacto sobre el sistema solución del suelo-agua subterránea. *Boletín Geológico y Minero* 111 (5), 47-62.
- Murillo, J.M., Mediavilla, C., Díaz, A. y Moreno, L. 1994. Primeros resultados y perspectivas futuras de la recarga artificial en el acuífero aluvial del bajo Guadalquivir. En *Congreso Nacional del Agua y Medioambiente*. Zaragoza. Madrid: TIASA.
- Nieto, P., Brissaud, F. y Mottier, V. 1994. Depuración natural de ARU mediante infiltración controlada. Un paso más. Parte II. Resultados obtenidos. *Boletín Geológico y Minero* 105 (3), 272-277.
- Sahún, B. y Murillo, J.M. 2000. *Identificación de acciones y programación de operaciones de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas - ITGE. Madrid.

Recibido: Enero 2003
Aceptado: Junio 2003